

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
**Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе**  
Российской академии наук

# **УГЛЕРОДНЫЕ И ВАН-ДЕР-ВААЛЬСОВЫ НАНОСТРУКТУРЫ**

**Тезисы докладов Молодежной конференции  
по физике полупроводников  
«Зимняя школа 2024»**

# **2024**

Санкт-Петербург (г. Зеленогорск)  
29 февраля – 4 марта 2024 года



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ им. А. Ф. ИОФФЕ  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

---

# УГЛЕРОДНЫЕ И ВАН-ДЕР-ВААЛЬСОВЫ НАНОСТРУКТУРЫ

Тезисы докладов Молодежной конференции  
по физике полупроводников  
«Зимняя школа 2024»

Санкт-Петербург (г. Зеленогорск)  
29 февраля – 4 марта 2024 года



**ПОЛИТЕХ-ПРЕСС**

Санкт-Петербургский  
политехнический университет  
Петра Великого

Санкт-Петербург

2024

**Углеродные и ван-дер-ваальсовы наноструктуры** : тезисы докладов Молодежной конференции по физике полупроводников «Зимняя школа 2024», Санкт-Петербург (г. Зеленогорск), 29 февраля – 4 марта 2024 г. – СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2024. – 126 с.

Сборник содержит тезисы докладов-лекций ведущих специалистов и тезисы докладов молодых ученых-физиков по материалам собственных оригинальных работ, представленных на Молодежной конференции по физике полупроводников «Зимняя школа 2024» (29 февраля – 4 марта 2024 г.). ФТИ им. А. Ф. Иоффе ежегодно проводит Зимнюю школу по физике полупроводников для аспирантов, молодых ученых и студентов старших курсов. В 2024 году основная тематика программы – углеродные и ван-дер-ваальсовы наноструктуры. Традиционно включены лекции, посвященные Нобелевским премиям по физике и химии. К 300-летию Российской академии наук в программе представлена лекция «Миссия Российской академии наук и фрагменты ее истории, отраженные в уставах 1724–2014 гг.».

Издание предназначено для молодых исследователей, преподавателей соответствующих специальностей вузов, научных работников и инженеров, специализирующихся в области физики полупроводников.

Редакторы: *Е. В. Куницына, П. А. Дементьев*

- © Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук, 2024
- © Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2024

- [6] V.I. Sysoev, D.V. Gorodetskiy, K.M. Popov, A.A. Makarova, L.G. Bulusheva, A.V. Okotrub. *Fabrication of high-rate microsupercapacitors by ultraviolet laser-assisted scribing of fluorinated graphene films*. J. Power Sources, **557**, 232549–232549 (2023).
- [7] N.I. Valynets, A.G. Paddubskaya, V.I.Sysoev, D.V. Gorodetskiy, L.G. Bulusheva, A.V. Okotrub. *Fluorinated graphene grating metasurface for terahertz dark state excitation*. Nanotechnology, **34**, 185702 (2023).

## **Элементы приборных структур из углерода: молекулярные аспекты**

Н.А. Поклонский

Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

В лекции дается мини-обзор актуальных для практики исследований электрических, оптических и магнитных явлений в трехмерных, двумерных, одномерных и нульмерных системах и элементах приборных структур из углерода. Объекты исследований — одиночные и консолидированные углеродные системы различной размерности в их физико-математическом, химическом и биомедицинском аспектах. Предметы исследований — квантовые состояния и процессы в таких разноразмерных системах. Вначале излагаются результаты исследований для трехмерных, а затем для двумерных, одномерных и нульмерных систем. Обозначены схемы разработки новых функциональных элементов и устройств из углеродных систем. Некоторые практические реализации приборных структур из таких систем приведены в обзорах [1–3].

### **Трехмерные системы**

Экспериментально открыто явление поглощения микроволнового электромагнитного излучения левитирующими в вакууме над поверхностью природного образца алмаза фотоэлектронами, возникающими при его межзонном фотовозбуждении [4]. Это явление обусловлено появлением положительного трибологического заряда [5] на поверхности алмаза вследствие влажной шлифовки его корундовым порошком с последующими промывкой в дистиллированной воде и сушкой на воздухе. Методом вибрационной магнитометрии при температуре  $T < 150$  К выявлено [6] магнитное упорядочение нескомпенсированных электронных спинов радиационных дефектов в облученных быстрыми реакторными нейтронами кристаллических зернах природного алмаза. Методом электронного спинового резонанса при лабораторных услови-

ях обнаружено состояние спинового стекла радиационных дефектов [7] в пластинках поликристаллического CVD-алмаза (выращенных по технологии [8]). Созданы алмазные  $p-i-n$ -светодиоды [9], испускающие одиночные фотоны в видимой области спектра электромагнитных волн при  $T \approx 300$  К. Разработаны полевой транзистор на электропроводящей гидрированной поверхности (110) природного алмаза [10] и ультрафиолетовые солнечно-слепые электронно-оптические преобразователи с фотокатодами из легированных бором поликристаллических алмазных пленок на сапфире [11]. Изготовлены [12] тонкие электроды на основе легированных бором кристаллов синтетического алмаза (адаптированные для регистрации нейрехимических процессов в человеческом мозгу [13]).

### **Двумерные системы**

Выведена концепция электромеханического нанодинамометра на основе бислоя (двух монослоев) графена с электрической проводимостью между слоями [14] и проведен расчет его параметров (методом туннельного гамильтониана Бардина [15]). Рассчитаны поверхности потенциальной энергии межслоевого взаимодействия ряда структур муара из бислоев графена [16]. Даны оценки энергетического барьера относительного сдвига и поворота монослоев (листов) графена из соизмеримого в полностью несоизмеримое состояние. Показано, что полученная величина барьера допускает сверхскользкость (см., например, [17]) бислоев графена при лабораторных условиях. Методами квантовой термодинамики рассчитана схема получения радикалов  $\text{OH}^{\bullet}$  и молекул водорода из потока паров воды между двумя изогнутыми в одном направлении листами графена [18]. Предложена [19] схема получения отрицательно заряженных молекул из потока электрически нейтральных молекул между двумя изогнутыми в противоположных направлениях листами графена. Методами теоретической электромеханики показана возможность скручивания листа графена в устойчивый рулон в виде спирали Архимеда [20]. Выполнен аналитический расчет квантовой электрической емкости двух плоских листов графена, разделенных монослоем из атомов аргона [21]. Расчетным путем показано [22], что чередующиеся слои параллельно расположенных рулонов из бислоев графен/нитрид бора и одностенных углеродных нанотрубок (угол между направлениями вдоль рулонов и нанотрубок в слоях равен  $\pi/2$ ) образуют метаматериал с отрицательным показателем преломления в инфракрасном диапазоне длин волн. Предложена [23] новая электромеханическая ячейка архивной памяти на основе тонкой мембраны (из нескольких монослоев графена), взаимодействующей кулоновскими силами и силами Ван-дер-Ваальса (см. эссе [24]) с торцевой поверхностью цилиндрического электрода, и проведен расчет ее рабочих характеристик. Квантовохимическими расчетами показано,

что поверхность потенциальной энергии межслоевого молекулярного взаимодействия в различных двумерных графеноподобных материалах универсально описывается первыми пространственными гармониками двумерного ряда Фурье (в параллельной слоям плоскости) [25]. Методом молекулярных орбиталей проведены расчеты [26] нанополоски графена типа *zigzag* 10zGNR (с числом *zigzag* цепочек 10) и установлено, что для такой полоски антиферромагнитное состояние является полупроводниковым (с энергетической щелью в спектре значений энергии  $\pi$ -электронов), а ферромагнитное состояние — полуметаллическим (*half-metal*; т.е. электропроводящим только для одной ориентации спиновых магнитных моментов  $\pi$ -электронов нанополосок). Это свойство углеродной *zigzag* полоски может быть применено для целей двумерной спинтроники [27]. В работе [28] дан расчет параметров  $\delta$ -легированных акцепторной примесью (бором) слоев в алмазе, необходимых для создания высокочастотных полевых транзисторов.

### **Одномерные системы**

Теоретически показано [29], что электрическое сопротивление наполненной атомами калия одностенной углеродной нанотрубки (квантовой проволоки) ступенчатым образом увеличивается при увеличении ее диаметра. Используя потенциалы Лиенара–Вихерта, предсказано возникновение релятивистского электрического поля вблизи прямой квантовой проволоки со стационарным баллистическим переносом в ней электронов [30]. Предложен и методами квантовой магнетомеханики рассчитан геркон на основе наполненных магнитными эндофуллеренами двух углеродных нанотрубок [31]. Предсказан фазовый переход «узкозонный полупроводник – металл» при аксиальном упругом растяжении одностенных углеродных нанотрубок [32], на основании которого могут быть разработаны новые элементы стрейнтроники [33].

### **Нульмерные системы**

Квантовохимическими расчетами предсказана углеродная молекула  $C_{10}$  в форме плоской пятилучевой звезды — прекурсор формирования низкоразмерных систем в углеродной плазме [34]. Теоретически показано [31], что эндофуллерен  $Fe@C_{20}$  обладает нескомпенсированным магнитным моментом электронов ( $\approx 8\mu_B$ , где  $\mu_B$  — магнетон Бора). При этом учтено, что электронный терм  $^5D_4$  свободного атома Fe в основном состоянии под действием возмущения с икосаэдрической симметрией карбододекаэдра  $C_{20}$  не расщепляется [35]. Предложены аналитический и численный алгоритмы решения загадки формирования полых макромолекул из атомов углерода [36]. Методом функционала плотности рассчитаны атомная и электронная структуры углеродных нанобраслетов — макромолекул, проявляющих свойства нульмерных, одномерных и двумерных систем [37].

## Литература

- [1] В.В. Климов, *УФН*, **191**, 1044–1076 (2021).
- [2] D. Araujo, M. Suzuki, F. Lloret, G. Alba, P. Villar, *Materials*, **14**, 7081 (2021).
- [3] H. Fei, D. Sang, L. Zou, S. Ge, Y. Yao, J. Fan, C. Wang, Q. Wang, *Front. Phys.*, **11**, 1226374 (2023).
- [4] А.Г. Захаров, Н.А. Поклонский, В.С. Вариченко, *ЖТФ*, **70**, 95–101 (2000).
- [5] Е.В. Рябов, Ю.С. Мухачев, *Письма в ЖТФ*, **36**, 32–40 (2010).
- [6] N.A. Poklonski, A.A. Khomich, I.A. Svito, S.A. Vyrko, O.N. Poklonskaya, A.I. Kovalev, M.V. Kozlova, R.A. Khmel'nitskii, A.V. Khomich, *Appl. Sci.*, **13**, 6221 (2023).
- [7] О.Н. Поклонская, *Вестн. БГУ. Сер. I: Физ. Мат. Информ.*, № 2, 60–65 (2013).
- [8] В.Г. Ральченко, В.И. Конов, *Электроника: Наука, технология, бизнес*, № 4, 58–67 (2007).
- [9] A. Lohrmann, S. Pezzagna, I. Dobrinets, P. Spinicelli, V. Jacques, J.-F. Roch, J. Meijer, A.M. Zaitsev, *Appl. Phys. Lett.*, **99**, 251106 (2011).
- [10] Ю.В. Гуляев, А.Ю. Митягин, Г.В. Чучева, М.С. Афанасьев, К.Н. Зяблюк, Н.Х. Талпов, П.Г. Недосекин, А.Э. Набиев, *Радиотехника и электроника*, **59**, 304–310 (2014).
- [11] В.А. Беспалов, Э.А. Ильичёв, И.П. Казаков, Г.А. Кирпиленко, А.И. Козлитин, П.В. Минаков, В.В. Сарайкин, А.В. Клековкин, С.В. Куклев, Г.Н. Петрухин, Г.С. Рычков, Д.С. Соколов, Е.Г. Теверовская, *Письма в ЖТФ*, **47**, 3–6 (2021).
- [12] K.E. Bennet, J.R. Tomshine, H.-K. Min, F.S. Manciu, M.P. Marsh, S.B. Paek, M.L. Settell, E.N. Nicolai, C.D. Blaha, A.Z. Kouzani, S.-Y. Chang, K.H. Lee, *Front. Hum. Neurosci.*, **10**, 102 (2016).
- [13] Г.Р. Иваницкий, А.А. Морозов, *УФН*, **190**, 1165–1188 (2020).
- [14] N.A. Poklonski, A.I. Siahlo, S.A. Vyrko, A.M. Popov, Yu.E. Lozovik, I.V. Lebedeva, A.A. Knizhnik, *J. Comput. Theor. Nanosci.*, **10**, 141–146 (2013).
- [15] J. Bardeen, *Phys. Rev. Lett.*, **6**, 57–59 (1961).
- [16] A.S. Minkin, I.V. Lebedeva, A.M. Popov, S.A. Vyrko, N.A. Poklonski, Yu.E. Lozovik, *Phys. Rev. B*, **108**, 085411 (2023).
- [17] N.V. Brilliantov, A.A. Tsukanov, A.K. Grebenko, A.G. Nasibulin, I.A. Ostanin, *Phys. Rev. Lett.*, **131**, 266201 (2023).
- [18] N.A. Poklonski, S.V. Ratkevich, S.A. Vyrko, A.T. Vlassov, N.N. Hieu, *Int. J. Nanosci.*, **18**, 1940008 (2019).
- [19] N.A. Poklonski, S.V. Ratkevich, S.A. Vyrko, A.T. Vlassov, *Journal of the Belarusian State University. Physics*, № 3, 57–64 (2023).
- [20] A.I. Siahlo, N.A. Poklonski, A.V. Lebedev, I.V. Lebedeva, A.M. Popov, S.A. Vyrko, A.A. Knizhnik, Yu.E. Lozovik, *Phys. Rev. Mater.*, **2**, 036001 (2018).
- [21] I.V. Lebedeva, A.M. Popov, A.A. Knizhnik, Yu.E. Lozovik, N.A. Poklonski, A.I. Siahlo, S.A. Vyrko, S.V. Ratkevich, *Comput. Mater. Sci.*, **109**, 240–247 (2015).

- [22] A.I. Siahlo, N.A. Poklonski, S.A. Vyrko, S.V. Ratkevich, *Semiconductors*, **52**, 1886–1889 (2018).
- [23] A.I. Siahlo, A.M. Popov, N.A. Poklonski, Yu.E. Lozovik, S.A. Vyrko, S.V. Ratkevich, *Physica E*, **84**, 348–353 (2016).
- [24] Е.И. Кац, *УФН*, **185**, 964–969 (2015).
- [25] A.V. Lebedev, I.V. Lebedeva, A.M. Popov, A.A. Knizhnik, N.A. Poklonski, S.A. Vyrko, *Phys. Rev. B*, **102**, 045418 (2020).
- [26] N.A. Poklonski, E.F. Kislyakov, S.A. Vyrko, O.N. Bubel', S.V. Ratkevich, *J. Nanophotonics*, **6**, 061712 (2012).
- [27] П.В. Ратников, А.П. Силин, *УФН*, **188**, 1249–1287 (2018).
- [28] В.А. Кукушкин, *ФТП*, **56**, 966–972 (2022).
- [29] Н.А. Поклонский, Е.Ф. Кисляков, Г.Г. Федорук, С.А. Вырко, *ФТТ*, **42**, 1911–1916 (2000).
- [30] N.A. Poklonski, I.A. Halimski, S.A. Vyrko, A.T. Vlassov, N.N. Hieiu, *Journal of the Belarusian State University. Physics*, № 1, 20–25 (2021).
- [31] N.A. Poklonski, E.F. Kislyakov, S.A. Vyrko, N.N. Hieiu, O.N. Bubel', A.I. Siahlo, I.V. Lebedeva, A.A. Knizhnik, A.M. Popov, Yu.E. Lozovik, *J. Nanophotonics*, **4**, 041675 (2010).
- [32] N.A. Poklonski, S.V. Ratkevich, S.A. Vyrko, E.F. Kislyakov, O.N. Bubel', A.M. Popov, Yu.E. Lozovik, N.N. Hieiu, N.A. Viet, *Chem. Phys. Lett.*, **545**, 71–77 (2012).
- [33] А.А. Бухараев, А.К. Звездин, А.П. Пятаков, Ю.К. Фетисов, *УФН*, **188**, 1288–1330 (2018).
- [34] N.A. Poklonski, S.A. Vyrko, A.I. Siahlo, O.N. Poklonskaya, S.V. Ratkevich, N.N. Hieiu, A.A. Kocherzhenko, *Mater. Res. Express.*, **6**, 042002 (2019).
- [35] Н.А. Поклонский, А.Т. Власов, С.А. Вырко, *Конечные группы симметрии. Основы и приложения* (БелЭн, 2011, Минск) 464 с.
- [36] A.M. Popov, I.V. Lebedeva, S.A. Vyrko, N.A. Poklonski, *Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures*, **29**, 755–766 (2021).
- [37] S.A. Vyrko, Yu.G. Polynskaya, N.A. Matsokin, A.M. Popov, A.A. Knizhnik, N.A. Poklonski, Yu.E. Lozovik, *Chem. Phys. Lett.*, **835**, 140999 (2024).

## Дробовой шум в резонансных туннельных структурах

И.В. Крайнов

ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

В данном докладе рассматривается шум тока в низкоразмерных системах, который позволяет получить дополнительную информацию о свойствах состояний электронов проводимости, не содержащуюся в среднем токе. Доклад